基因轉殖植物雜草風險研究與評估

蔣慕琰* 袁秋英
行政院農業委員會農業藥物毒物試驗所公害防治組

摘　要

雜草性是基因轉殖植物之主要環境關切議題。轉殖植物之風險評估均涵蓋基因流佈、雜草性、非目標生物效果及抗性衍生等關鍵風險因子。目前所有雜草風險評估均屬相近轉殖與非轉殖植物之定性比較。主要評估指標包括種子發芽、幼苗生長勢、營養生長、種子產量、繁殖體散佈、休眠性、耐逆境（生物/非生物）、成活率及淨代換率等。部份指標也用於表示轉殖植物之入侵性、長存性、競爭性或生態適應性。理想風險評估需探討風險可能性與風險後果，由此兩部份資料訂定之風險等級，再用做為風險管理與管制之依據。此文檢視國際文獻所提出風險評估差異處理之方法，這些方法包括使用階層系統及風險等級歸類。並介紹美國及澳洲轉殖玉米、油菜及棉花風險評估個案。台灣已投入可觀人物力資源，發展轉殖植物之上游研究，但環境評估架構與程序之發展仍在起步階段，情勢非常不利轉殖植物之合法推出。此文以雜草為重心，檢討台灣轉殖植物環境安全之情勢，並提出未來走向與因應方式之看法。

關鍵字：雜草性、基因轉殖植物、基改作物、風險評估、環境安全

前　言

1980 年代後期，基因轉殖植物進入田間試驗階段，此新技術克服種間基因交換之障礙，其所培育之作物或其他生物，在食用安全及環境衝擊之負面影響引起各界高度關切。1990 年代以來，基因轉殖之番茄、大豆、玉米、棉花、油菜、木瓜等作物已大規模栽培生產。而有關環境之爭論不斷，並與政經利益與價值觀糾纏不清，成為基因轉殖植物發展之主要負荷。

基因轉殖植物潛在環境風險直接或間接與雜草有關者，為作物野化為雜草、轉基因之有性散佈及對非目標生物之影響。1980 年代，轉殖植物尚在研發階段，雜草已被視為重要問題；1989 年之專書『Field Testing Genetically Modified Organisms: Framework for Decisions』即以特別章節『Enhanced weediness: a major environmental issue』介紹相關之問題（NRC 1989）。過去十

* 通訊作者（電子信箱: myc@tactri.gov.tw; 聯絡電話: 886-4-23302101-602; 傳真: 886-4- 23323073）

餘年來有大量文獻檢視轉殖植物之雜草問題，各國轉殖植物之管理上，也將雜草特列為環境安全必須審核之項目。目前大規模生產之基因轉殖作物約 80% 帶有抗除草劑之基因與特性（Agbios 2005）。非選擇性除草劑嘉磷塞（glyphosate）及固殺草（glufosinate）之廣泛使用，也衍生雜草抗藥性問題及間接對生物多樣性之衝擊。

本文利用文獻資料，檢視轉殖植物之雜草問題，環境安全測試與評估體系，並討論環境風險對台灣之意涵。

一、雜草簡介

（一）雜草相關用語及意涵

通俗用語中雜草泛指農地、庭園、居住環境附近發生，不為人所喜歡，具有負面作用之植物。中文及漢字使用地區因『草』字之出現，多半將雜草與草本植物關連，而英文對應之 weed 則無『草』之意涵。英語世界中，weed 一般所指為引起問題而不受歡迎之植物（包含草及其他類別之植物），並無廣為各界所接受之定義，也不具分類上明確身份與位階。美國雜草學會曾視雜草為於生長所在地不受歡迎之植物（ A plant growing where it is not desired ）（Randall 1997）。Randall 主張將雜草與棲地關連，在農作物之田區、 牧場及自然環境之範圍中，分別使用農業雜草（agricultural weeds）、牧地雜草（range weeds）與環境雜草（environmental weeds 或 （natural-area weeds）。水生雜草、水田雜草、旱地雜草、草地雜草、草坪雜草、果園雜草、森林雜草等都是以棲地區分之用語。雖然廣義之雜草可涵蓋各類環境之不受歡迎植物，狹義之雜草主要是指農地或其他經常受人類干擾環境中之植物；很多重要雜草研究及文獻，均係針對狹義之雜草而言。

植物之價值經常因人、時、地而有差異，同一種植物，有人視為必須除掉之雜草，也有人看中其可利用之優點；例如農田中主要雜草龍葵及鴨舌草，也可是可口之野菜。在雜草防治、檢疫、植物保護等領域中，宜將『雜草』一詞與植物之負面特性相關連，並採取與國際相類似之『雜草』定義，包括草以外其他植物，以減少溝通上之混亂。如果涉及同種植物之優良特性時，則使用『野草』、『有用植物』、『野生植物』等語彙。

（二）雜草之重要特性

生物及植物特性之掌握，有利於雜草發生預測及管理，相關研究一直是農業及生態領域上重要之課題。最為廣泛引用之雜草特性包括涉及發芽、營養生長及繁殖等 12 項性狀（Baker 1965, 1974，表一）。很多基因轉殖植物之環境評估，均以雜草之植物特性為依據。Baker 所列舉者為一概念性之性狀，各類

植物均帶有部份性狀，很少植物可具備所有之條件。所列性狀原本針對如農田之干擾棲地（disturbed habitat），但有部份特性也適用於自然棲地（Hancock and Hokanson 2001）。Keeler（1989）之研究顯示全球最嚴重 17 種雜草、一般植物與農作物所具有 Baker 雜草特性之平均比率分別為 85.6、59 及 42%。Baker 所列雜草性狀約半數由單一基因所控制（Keeler 1989），快速生長、種子休眠性及競爭力等特性多屬數量性狀（quantitative trait）（Basu *et al* 2004）。

雜草在不同環境之發育生存與其可用資源之分配息息相關。資源分配之代表為 r-selected 及 k-selected 種，前者將大部分資源分配到生殖部份，具有生長期短、快速生長進入繁殖期、高繁殖力及高度移動性之繁殖體等特性。後者僅將少數資源分配生殖部份，具生命期長、植體大及競爭力強等特性（Booth *et a*l 2003, Rodosevich and Booth 1984）。環境經常受干擾之棲地如農田、路邊、溝邊所發生之雜草多為 r-selected。能侵入自然棲地之種類多為 k-selected 或另外一類為環境逆境忍耐種（stress tolerator）。很多雜草在農作栽培過程中，演變得特別適應栽培之環境。台灣之兩作水稻田中，水稻栽培期短且管理集約，雜草需要能在很短期間完成生命週期，才能在台灣水田存活。主要雜草如球花蒿草（*Cyperus diffomis*）及旱田之香附子（*Cyperus rotundus*）雖然也可在自然環境中發生，但其發生頻率與生物量均遠較農地者為少。

（三）雜草與作物之關連

作物與雜草（野生植物）之相互關係可分以下三類：1. 野生植物馴化為作物、2. 作物野化為雜草、3. 兩者之雜交演變為雜草（Ammann *et al* 1996, De Wet and Harlan 1975）。

農作物均是人類馴化野生植物所得。在採集、選拔、育種及栽培之過程中，很多野生植物族群中特性以及相關之基因被有意或無意淘汰。人類偏好之植物性狀如發芽整齊、同時開花結實、高含量成分（澱粉、油份、蛋白質）、口感及風味等往往不利作物之自然繁衍。

高度馴化之作物多僅存活於人類刻意維護之農田中。以台灣而言，雖然大面積栽培水稻、玉米、花生、大豆、甘薯各類菜蔬及果樹，除了少數可短暫在後作及田區周邊發生外，很少在非栽培環境中看到這些作物。低度馴化之栽培植物，則容易野化為雜草；很多早年被引入台灣為觀賞、地被、牧草、藥草及加工之外來植物，已逃離栽培之區域，四處散佈為危害環境之雜草（蔣等 2003）。以全球之尺度而言，大多數作物均有其類緣相近之野生種，13 種大面積栽培作物中有 12 種均可與其野生近緣種雜交。此類近緣雜交可產生危害潛力相當高之雜草植物。各地已發現之實例包括裸麥（*Secale cereale*）、甜菜（*Beta vulgaris*）、油菜（*Brassica napu*）等（Ellstrand *et al* 1999, NRC 1989,

Ammann *et al* 1996）。

二、轉殖植物之環境風險及評估

轉殖植物環境風險因子可概分為下列四類：轉入基因之流佈（花粉至近緣植物之有性轉移、基因至其他不相干物種之無性轉移）、活體作物（雜草化）、非目標生物（有利種、有害種、土壤微生物、保育物種、生物多樣性）及害物抗性衍生。

風險因子之認定（hazard identification）常具有主觀之色彩，亦受環境差異、研究新發現與法規之影響。由文獻及經驗可建構風險因子之清單（表二），再針對這些因子行進一之評估，對新產生而所涉複雜之轉殖植物而言，有些風險因子可能被忽略，較理想之方式為採用 logic Tree Analysis (Fault-Tree/Event-Tree) 有系統的找出所涉之因子（Koivisto *et al* , 2001NRC 2002, Hayes 2004）。

（一）環境風險評估之原則及架構

科學基礎（science-based）、個案（case by case）及比較性（comparative）是一般強調之原則。現代高產與高效率之農業及作物栽培，本質上即不利於自然環境與生態（Ammann 2004），農耕系統中，任何一主要成員（農藥、肥料、灌溉、作物、農機）之改變，均可導致影響與衝擊。因此轉殖植物之風險評估，不是對轉殖植物影響之絕對性探討，而是轉殖與非轉殖植物之比較及是否改變了風險之程度（NRC 2002）。卡塔赫納生物安全議定書（Cartagena Protocol on Biosafety, CBD 2005）所強調之預防原則（precautionary principle）則已為被歐聯及日本所採用（Gray 2002, Hayashi 2004, European Commission 2001）。此原則之採用，可能導致轉殖生物環境風險評估所涉範圍之擴大，使整個過程更為複雜。

理想之風險評估（risk assessment）包含風險因子認定（hazard identification）、可能性（likelihood, probability）分析、後果（consequence）分析、風險推估（risk estimate）及不確定與顯著性分析等單元；完整之風險分析（risk analysis）尚包含與評估相關連之風險管理與風險溝通（Hayes 2004）。試驗數據、流行病分析（epidemiological analysis）、理論模式、專家判裁及管制性判裁（regulatory judgement）等均常用於轉殖生物之風險評估及管理；轉殖植物商業栽培前之評估主要依據測試數據、專家及管制判裁。栽植後之監測與管理常利用理論模式所預測之情況及流行病分析（NRC 2002）。

化學物（農藥、污染物、毒物質及有害化學物）之環境風險分析有相同之架構，其方法過程多已成型。一般是依據控制變數實驗、實際調查及理論推估

取得劑量反應（dose-response）與暴露量（exposure）資料，再行風險計算（risk calculation），最常用者由環境暴露量除毒性量所得之風險係數（risk quotient＝exposure/toxicity）(EPA 1998)。這是可信度及再現性均較佳之量化評估（quantitative assessment）。生物體因具繁殖力，在環境中之變化遠較化學物複雜。由於變數多且不易掌握，病、蟲、草等害物與基因改造生物之量化評估相當困難，風險評估體系多為比較性之定性評估（qualitative assessment）。

歐美學者曾對轉殖植物風險發生可能性（likelihood）及後果（consequence）歸類，這可用於處理不同作物之測試需求，風險小者可採較簡單之評估過程，類別化分之依據包括基因距離（Ervin and Welsh 2003）、基因作用（Hancock 2003）、散佈指標（Ammann 1996）等。

澳大利亞為已建立轉殖植物環境風險分析完整體系之少數國家。其轉殖生物所用之評估架構，可能性及後果各分四級，再由關連之 16 個組合情況設定四類風險等級（可忽略-negligible、低-low、中-moderate、高-high）（表三），風險等級則進一步用以為風險管理之參考與依據（Hayes 2004, OGTR/Australia 2005）。

（二）環境風險評估利用

轉殖生物之環境風險評估最主要目的在提供管制依據，管制措施之合法及合理性需建立在風險評估之基礎上（NRC 2002）。對風險因子（hazard）之敏感程度隨人而異，文獻上可看到很多依主觀意識所建立之各種風險評估架構與理論，其複雜程度差異很大。而實際管制用之風險評估，則需平衡當地環境特殊性與產業發展之需求。

國際間對基因轉殖植物之研發存有相大的差異，美加是支持轉殖植物發展之主力，歐洲各國是主要反對力量。前者對風險評估及管理採取之標準較後者為寬鬆。以美國為例，申請者可向主管當局農部之 APHIS 請准（permit）或較簡單之通知（notification）之方式，即可控制性釋放（control release）進行田間測試； 1987 至 2004 年田間試驗已超過 11000 次（點），涉及之植物超過 80 種。1992-2004 間，以來正式提出非管制身份（non-regulated status）有 103 案，其中 67 案（含 15 種作物）已取得商業栽培之許可（APHIS 2005）。美洲以外地區，實際通過風險評估，取得商業栽培之個案不多，主要在南非、澳洲等國（Agbios 2005）。

三、轉殖植物之雜草問題及安全評估項目

轉殖植物雜草問題之關鍵，在導入基因是否會增強作物或近緣植物之雜草性，（weediness）、競爭力（competitive ability）、長存性（persistence）或生態

適應性（ecological fitness）。這均屬概念及總和之特性，單一植物性狀及農藝特性指標與此雜草特性之關連性不高，因此很難用預測方法來決定，必須經由試驗數據來判斷。轉殖植物除表現原預期之基因效果外，也可能產生不易掌握之多重效果（pleiotropic effect），由基因特性之預測也有其侷限。

（一）外來入侵植物與轉殖植物之比較

外來入侵植物及轉殖植物均需行雜草風險評估，檢疫用針對可能入侵植物及雜草之風險評估，以境外文獻資料為主要依據，由於管制對象多尚未在本地發生，很少進行在地之實際測試。轉殖植物因需要在本地栽植或利用，其評估則以測試數據為主，但觀察測試之項目與外來入侵植物評估者有很多相近。

入侵外來植物風險評估依靠植物特性、環境配合及分類關連等三方面之訊息。植物性狀（trait）：包括植物形態、發育、生理、生態等特性，如生命週期短、繁殖力強、繁殖體小易散佈、抗環境逆境等。美國農部動植物健康檢查署（APHIS）所用雜草風險評估中有關擴散潛力之評估，即依據種子休眠、發芽率、逆境忍受力等 10 項植物特性（APHIS 2004）。環境配合（climate-matching, environmental compatibility）：依據植物已知分布範圍之環境與氣候條件，來預估其可能之侵入與擴散區域；也以棲地之環境條件，推測能侵入植物之種類與危害程度。分類關連：根據植物各地生態與危害之文獻記錄，歸納特定分類群（taxon）或屬性相近植物風險性之高低及可能之散佈範圍。不少學者認為依據分類關連之預測，仍是目前最可靠者（蔣等 2004，Groves *et al* 2001）。

各種方式均有其侷限性，很難以單一方法行可靠之預估。目前實際使用之雜草風險評估，均為納入多種方式之複合式預測體系。評估方法用於預測之可靠性，可以導入實際資料加以檢定，可靠性高者所得到之正反面誤判（false positive/false negative）較少（蔣等 2004）。

目前檢疫雜草風險評估均屬比較性之定性（qualitative）評估。評估者針對所設計之多組問題選答，由答案之累計計分決定風險程度。澳洲雜草檢疫風險評估：此方法針對植物之馴化/栽培（domestication/cultivation）、氣象與分布（climate and distribution）、其他地區雜草（weed elsewhere）、受排斥特性（undesirable traits）、植物型（plant type）、繁殖（reproduction）、散佈機制（dispersal mechanisms）與持久屬性（persistence attributes）等八大項設計有 49 個選題，每題需依據該題之說明，選擇『是』、『否』或不作答。各題之答案屬雜草與非雜草特性者分別得+1 與-1 分，未作答者不計分。累計分數越高者其風險愈大。評估對象植物依計分歸為 3 類，計分為負數（<0）者屬低風險允許輸入，計分大於 6（>6）者為高風險禁止輸入，計分落於 0-6 者需以栽培觀察進一步評估 （蔣等 2004，Biosecurity Australia 2005）。

有不少學者主張外來入侵種之模式可用於評估轉殖植物釋放（release）之風險。Hancock and Hokanson（2001） 認為外來植物之預測涉及不熟習外來植物全部基因之表現，而轉殖植物多半僅改變已熟知植物之單一或少數基因，故轉殖植物之環境影響之評估遠較入侵種者為單純且可靠。

（二）基因轉殖植物之雜草評估

測試項目：基因轉殖植物雜草風險因子主要為作物本身及自然雜交後代。競爭性（competitiveness）、持久性（persistence）、入侵性（invasiveness）、適應力（fitness）均是轉殖雜草評估之經常用語，可概括以雜草性（weediness）來代表。雜草性之實際評估可包括多項植物體及其繁殖體特性：如種子休眠性、種子活力、種子發芽、種子散佈、fitness component(survival, pollen, viability, competitive ability, seed quality, growth rate, time of flowering, flower production, visitation rate of pollinators）等（表二）。有些項目可在轉殖植物基本農藝性狀調查時取得，休眠性等資料則需特別進行測試以取得數據。

1. 多地點測試：可以對農田及農田以外環境造成影響。在農田環境繁衍之雜草需要具有可忍受人類活動高度干擾之特性，農田以外之環境則變異更大。如考慮對半自然及自然環境之衝擊，則需在實際可能入侵之環境中做測試。我國目前之環境安全評估只限制於農試所、中興大學及亞洲蔬菜研究發展中心等指定而合乎規定之場所實施。由於這些場所之環境代表性受限，在對入侵性之評估上先天即不適宜。
2. 階層測試（tier system）：完成所有涉及項目之測試相當費時且耗費資源。美國APHIS早在1980年代即提出依據對轉殖植物之熟習度（familiarity）採行階段起動之評估過程。對已熟知之作物及表現特性行較簡潔之流程（NRC 2002）。歐美學者陸續提出之之差異處理方式包括 Rissler and Mellon在1993年提出3階、丹麥所採行之5階系統（Kjær *et al* 1999），此兩系統之簡要訊息見表四。
3. 風險等級（risk level）：也有學者主張依風險程度行差異性處理。瑞士學者（Ammann 1996）所主張之系統是依據文獻或測試資料將花粉、繁殖體（diapores）及植物體之散佈特性，分別劃分以代號表示之6個等級，所組合之散佈指標（dispersal index）用以劃分植物之雜草風險等級。Hancock（2003）依據對轉殖作物之入侵潛力（potential invasiveness）分為6等級，轉入基因對作物生態適應衝擊（fitness impact）分為5等級（1-中性基因如marker genes、2-不利基因包括雄不孕、改變纖維品質、果實成熟及儲藏性、3-抗除草劑基因、4-抗病毒、真菌及害蟲之基因、5-有利基因涉及耐冷、乾旱、重金屬、改變養分取得、改變發育），再由植物體與基因等級之組合

（crop-transgene combination），決定轉殖植物風險程度（表五）； Hancock 認為不具風險者不必再測試，低風險者僅行簡單探討，風險高者才需要嚴謹之評估。

4. 長期及大規模評估：美國之管理體系中，風險評估依據隔離設施與小規模田間測試，就設定風險因子比較轉殖植物及最接近之未轉殖植物品系之差異，所取得之資料如顯示轉殖植物未較對照品系之風險高，即可通過風險評估。小規模測試有其先天之侷限性，不適於偵測轉殖植物之複雜生態後果。長期及大規模之評估屬於轉殖植物商業栽培後（post-marketing）之風險管理（risk management）。

美國雖是轉殖植物之主要栽培國家，但找不到規模評估文獻，農業科技協會（Council for agricultural Science and Technology, CAST）出版物『Comparative Environmental Impacts of Biotechnology-derived and Traditional Soybean, Corn, and Cotton Crops』為分析相關文獻之報告，其主要結論包括生物科技產生之大豆、玉米、棉花未構成特殊與傳統育種所得之作物有別之環境風險（Carpenter *et al* 2002）。長期及大規模之實地評估主要見於源自英國之探討。Crawley 等之研究涉及轉殖作物在自然棲地長期表現（4 作物-12 棲地-前後 10 年），發現為轉殖作物之入侵性與久存性均未高於對照之傳統作物（Crawley *et al* 2001）。英國政府所主導之農地規模評估（farm scale evaluations）開始於 1999 前後 5 年，涉及 3 種耐除草劑轉殖作物在全國各地 266 田間測試，此評估主要研究對雜草、昆蟲及鳥類等生物多樣性組成物種之影響。此耗費 600 萬英鎊研究發現，除草劑使用之差別是導致生物多樣性差異之主因（Heard *et al* 2003, Defra 2005）。

四、基因轉殖植物雜草評估案例

美國是基因轉殖植物栽培之最主要國家，1992 年 Calgene 之轉殖番茄（Flavr Savr）首先取得商業栽培許可，至 2004 年為止農部動植物健康檢查署（APHIS）核准商業栽培之個案（取得 non-regulated status）已有 67 個。商業栽培核准之前，申請者需提出包含環境風險在內之完整之文件供審核。這些文件多半可自該局之網頁取得（APHIS 2005），澳洲之相關文件也均放在基因技術局（The Office of the Gene Technology Regulator）之網路資料庫（http://www.ogtr.gov.au/gmorec/）。這些文件均可用以一窺國際上轉殖植物安全性評估之實際內容。

（一）早期個案比較

Parker and Kareiva (1996)曾利用審核文件，比較 1992-1995 年間核准之部

份個案有關雜草之評估。比較之作物有番茄、南瓜、棉花、大豆、油菜及馬鈴薯等。這些個案所提出之主要資料，為基於文獻之文字歸納與論證，所呈現之文字資料包括：1. 列出 Baker 之雜草特性（表一）並指出轉殖作物僅具有少數雜草性狀，轉入基因不至改變雜草性狀、2. 文獻未報導此植物及相關之雜交種為雜草、3. 此作物容易防治及管理。田間測試所取得之數量化資料不足，直接針對雜草性（weediness）之試驗數在個案間差異大（0-5 次）。生態學者常不滿這些資料之貧乏，Parker and Kareiva (1996)認為這多少與缺乏明確可供遵循之風險評估準則有關。

（二）代表性案例簡介

近年已核准之案件已遠較個 1990 年代中期為多。但案件間對評估內容仍然存在明顯差異，資料審核單位顯然不要求報告呈現資料之一致性，差異之現象亦可視為風險評估基於科學基礎及『case by case』之結果。

玉米（美國）：1996 年 Monsanto 公司含 *Bt* 基因（Cry1 Ab）抗蟲玉米 MON 810 之相關資料，被 Agbios 列為環境風險之標準案例（Agbios 2001），這份報告中雜草及近緣種雜交部份各有三頁，雜草部份唯一呈現之數量資料為發芽率之比較（MON 810 與對照之平均發芽率分別為 87.1 及 90.6，發芽率範圍分別為 71.1-94.3 及 78.9-98.3），其他均為取材自文獻有關雜草特性、種子散佈及種子發芽之文字描述。2003 年 Dow 公司之 Line 59122 抗蟲（Cry34/35Ab1）耐除草劑（*pat* 基因）玉米，提出報告中雜草及近緣種雜交部份各僅一頁之文字描述。2004 年 Monsanto 之 MON88017 抗蟲（Cry3Bb1）耐除草劑（CP4 EPSPS）玉米玉米報告，雜草及近緣種雜交部份含不足兩頁之描述，但在表現型與生態評估部份（超過 10 頁）有涉及雜草相關資料如發芽率、種子休眠性、花粉活力及農藝競爭力性狀等，這些資料實際取材自 2 年 20 餘次田間測試（http://www.aphis.usda.gov/brs/not_reg.html）。

油菜（美國）：1997 年由 AgrEvo 公司（已併入 Bayer）之耐除草劑油菜 Event T45 所提出之報告（515 頁），列有詳盡雜草評估資料（超過 70 頁），支持無雜草風險之評估之項目包括發芽、種子生產、淨代換率、競爭力（株數及生物量）、侵略指數（aggressivity index）、農藝性狀、抗病蟲力、環境逆境反應、種子發芽（室內測試、田間自生族群）、殘留效力及對其他除草劑敏感度（化學休耕狀況）等。這些項目中僅少數測試地點之轉殖油菜有成熟期延長之現象，其於均與對照系統無差異或更不具雜草性（http://www.aphis.usda.gov/brs/not_reg.html）。

棉花（澳洲）：2002 年 Monsanto 公司含 *Bt* 基因（Cry1 Ab）抗蟲棉花 INGARD event 531 向澳洲基因技術管制辦公室（Office of the Gene Technology Regulator,

OGTR）申請商業栽培（commercial release）之主文件計 121 頁（DIR 056/2004 - Application for licence for dealings involving an intentional release into the environment Risk Assessment and Risk Management Plan - http://www.ogtr.gov.au/gmorec/ir.htm#table ）。雜草部份有 6 頁包含以下單元之說明：1.傳統棉花之雜草性、2.棉花種子環境散佈、3.環境中棉花自生株（volunteers）之發生、4. INGARD 棉花之雜草潛力、5.INGARD 棉花之選擇性優勢。此報告之數量資料（種子散佈、發芽、存活、繁殖力、入侵力）主要依據另一份完成於北領地（Northern Territory）之田間測試報告『Evaluation of the Potential Weediness of Transgenic Cotton in Northern Australia』（Eastick 2002）。

結語－轉殖植物環境風險之台灣意涵

美國是基因轉殖植物最主要研發及生產國，代表美國科技主流觀點之美國國家科學院（The National Academy of Sciences）主張轉基因過程不引出新風險（The transgenic process presents no new categories of risk），而傳統育種或轉殖育種所產生之特殊性狀（trait）則均可導致特定之風險（NRC 2002）。由於長遠來之安全經驗，人們對傳統育種產物已深具信心，國際間甚少對傳統育種產物行風險評估及管理。基因技術研發間短，潛在問題尚未被充分掌握；轉殖植物之安全性則均需藉風險評估來確認。具國際約束力之『生物安全議定書』（Protocol on Biosafety）對活體改造生物（living modified organism）之利用及風險評估等訂有明確之原則性規範（CBD 2005）。台灣雖非締約國，但亦宜遵循其規範，以利國際來往互動。

商業生產之轉殖作物均需通過環境風險評估，過去十餘年實際案例顯示，不同轉基因或相異轉殖作物，其所評估方法與探討項目差異相當大。學術理論及實務均顯示，風險評估需要以個案處理（case by case）方式進行。不宜將缺乏彈性之評估框架套用於所有轉殖植物。台灣應建立適合在地環境之階層（tier）測試体系，由科學文獻及早期測試之農藝性狀資料，設計差異性評估流程。對潛在風險高之轉殖植物，行嚴謹而針對性評估；屬低風險類植物，則採簡捷流程，使其儘快通過管制，取得商業栽培許可。

全球基改作物（genetic modified crops, GMCs）2004 年栽培面積已達 8.1 千萬公頃，美國佔 4.75 千萬公頃（James 2005）。美國農業科技協會（CAST）之環境衝擊報告（Carpenter *et a*l 2002）顯示，轉殖大豆、玉米、棉花在美國之大面積栽培，有助於穩定生產、降低成本、水土保育及有益昆蟲族群。對轉殖油菜、馬鈴薯、玉米及甜菜前後 10 年之研究顯示，這四種轉殖作物均不具

雜草性（Crawley *et al* 2001）。英國對耐除草劑油菜、玉米及甜菜之農地規模評估（farm scale evaluations）試驗，亦未發現三種轉殖作物對生物多樣性之直接負面影響；玉米田昆蟲增加與另兩種作物田雜草減少（可能影響鳥類取食）均為除草劑使用改變之影響（Heard *et al* 2003, AgBioView 2003, Defra 2005）。立場偏激團體利用此結果，對基改作物大肆韃閥（http://www.greenpeace.org.au/）。而奇詭的是造成影響的是除草劑，過度除草之影響，可輕易由降低劑量而改進；減少用藥反而對環境有益。

基因轉殖植物多僅涉及單一或少數基因之改變，其對環境可能影響遠低於外來入侵植物（alien invasive plant），任何入侵植物均可將其體內全部基因引入環境（Hancock and Hokanson 2001）。台灣入侵植物問題非常嚴重，低海拔地區肆虐之種類近百種，菊科即有小花蔓澤蘭、銀膠菊、香澤蘭、大花咸豐、豬草、美洲闊苞菊、翼莖闊苞菊、掃帚、加拿大蓬、紫花藿香薊等種類（蔣等 2003），經由侵佔棲地/排擠弱勢植物/改變關連物種等作用，造成高度危害。精耕農地以外之棲地中，滿目所見多為入侵植物。台灣目前研發之轉殖植物如木瓜、水稻、番茄、甘藍菜、菊花、瓜類等多屬高度馴化或野生力弱之種類；外來入侵植物相較之下，基改作物之雜草風險即顯得微不足道。至目前為止，台灣尚未建立有效評估與管理入侵種之体系。

轉殖植物是台灣農業生物技術研發之重要項目，上游研發已投入可觀人物力資源，發展之對象涉及十餘種農園藝植物，其中部份已進入田間測試階段。但是關連之環境安全工作，到最近兩年才開始被注意（郭及周 2004，李及徐 2004），『基因轉殖植物田間試驗管理辦法』也在最近才公布（農委會 2005），在無適當規範及人物力缺乏情況下，環境安全工作多在艱辛中摸索前行，還需承接造成產業發展瓶頸之壓力。而台灣對境外農產物有高度依賴，很多進口農產品為具環境風險之活體改造生物（袁及蔣 2002，袁等 2003，郭及周 2004），而未要求輸入境內活體產物（如玉米及大豆，均具發芽力）之環境風險評估，也未執行相關之管理。這種差別處理非常不利國內農業生技之發展。

已公告之法規對田間試驗之規範顯示，台灣對轉殖植物之採行之標準較接近歐聯及日本，而遠較美國為嚴謹。具實質意義之環境風險評估，常需依靠不同環境條件之測試結果。目前田間試驗機構設置所設定之標準，幾無可避免的限制了可能測試之場所及環境，增高環境評估之困難度並延緩其完成之期程。農業生物技術整體規劃及管理亟需調整，研發投資才可能有相當之產出與報酬。

參考文獻

李國欽、徐慈鴻。2004。GMO/GMF 風險評估與風險管理方法。郭華仁、牛惠之（編輯）基因改造議題-從紛爭到展望：82-99。行政院農業委員會動植物防疫檢疫局。

袁秋英、蔣慕琰。2002。 進口大豆抗嘉磷塞除草劑之測定及其基因特性之探討。台灣農業化學與食品科學。40:119-128。

袁秋英、謝玉貞、蔣慕琰。2003。台灣市售飼料玉米抗固殺草基因特性研究及相關基改產品檢測。植保會刊 45:329-342。

郭華仁、牛惠之（編輯）2004 基因改造議題-從紛爭到展望。行政院農業委員會動植物防疫檢疫局。

郭華仁、周桂田。 2004。基改作物的全球經驗。郭華仁、牛惠之（編輯）基因改造議題-從紛爭到展望：120-157。行政院農業委員會動植物防疫檢疫局。

農委會。2005。基因轉殖植物田間試驗管理辦法。全國法規資料庫。http://law.moj.gov.tw/

蔣慕琰、徐玲明、袁秋英、蔣永正。 2003。台灣外來植物之野化與生態。 2003 植物生物多樣性與植物資源永續利用研討會論文集：47-65 東海大學。

蔣慕琰、徐玲明、袁秋英、蔣永正。 2004。 雜草及外來植物風險評估介紹。行政院農業委員會農業藥物毒物試驗所技術專刊第 133 號。

Agbios 2001. Principles and Practice of Environmental Safety Assessment of Transgenic Plants. Agriculture and Biotechnology Strategies (Canada) Inc. http://64.26.172.90/docroot/articles/esam.pdf

Agbios 2005. Global status of approved genetically modified plants. http://64.26.172.90/dbase.php?action=Synopsis

AgBioView 2003. Today's AgBioView (November 11, 2003) http://www.agbioworld.org

APHIS 2004. Weed Risk Assessment Guidelines (version 5.3). Animal and Plant Health Inspection Service (USDA APHIS), http://www.aphis.usda.gov/ppq/weeds/wra.pdf

APHIS 2005. Petitions of Nonregulated Status Granted or Pending by APHIS. Animal and Plant Health Inspection Service (USDA APHIS), http://www.aphis.usda.gov/brs/not_reg.html

Ammann, K. 2004. Biodiversity and Agricultural Biotechnology – A Review of the Impact of Biotechnology on Biodiversity. Botanical Garden, Berne, Switzerland.

http://www.botanischergarten.ch/Biotech-Biodiv/Report-Biodiv-Biotech3.doc

Ammann K, Y. Jacot and R. Al Mazyard 2000. Weediness in the light of new transgenic crops and their potential hybrids J. Plant Dis. 17: 19-29.

Ammann, K., Y. Jacot, P. Mazyad and P. Rufener 1996. Field release of transgenic crops in Switzerland – An ecological risk assessment of vertical gene flow. In: "Gentechnisch Veranderte Krankheitsund Schadlingsresistente Nutzpflanzen". vol. 1 Chapter: 3 pp. 1-157. http://www.botanischergarten.ch/debate/techdef5a.pdf

Baker, H.G. 1974 . The evolution of weeds. Annu. Rev. Ecol. Syst. 5: 1-25.

Baker, H.G. 1965. Characteristics and modes of origins of weeds. Pages 147-172 in Baker, H.G., and G.L. Stebbins, eds., The Genetics of Colonizing Species. Academic Press.

Basu C, M.D. Halfhill, T.C. Mueller, C.N. Stewart 2004. Weed genomics: new tools to understand weed biology. Trends Plant Sci. 9(8):391-398.

Biosecurity Australia 2005. The Weed Risk Assessment. Department of Agriculture, Fisheries and Forestry, Australia. http://www.affa.gov.au/content/output.cfm?ObjectID=D2C48F86-BA1A-11A1-A2200060B0A04014

Booth, B.D., C.J. Swanton, S.D. Murphy 2003. Weed ecology in natural and agricultural systems. Oxford University Press/CAB International Press.

Carpenter, J., A. Felsot, T. Goode, M. Hammig, D. Onstad, S. Sankula. 2002. Comparative Environmental Impacts of of Biotechnology-derived and Traditional Soybean, Corn, and Cotton Crops. Council for Agricultural Science and Technology CAST: I-189. http://www.talksoy.com/ComparativeStudy/default.htm#

CBD 2005. Cartagena Protocol on Biosafety. Convention on Biological Diversity. http://www.biodiv.org/biosafety/protocol.asp

Crawley, M.J., S.L. Brown, R.S. Hail, D.D. Kohn, and M. Rees 2001. Biotechnology: Transgenic crops in natural habitats. Nature 409: 682-683.

Custers, R.(ed.) 2001. Safety of Genetically Engineered Crops. VIP publication (Flanders Interuniversity Institute for Biotechnology). http://www.vib.be/NR/rdonlyres/FDA6861D-5E31-40EB-A500-5108D538AD6F/0/TASOreport_finaalpdf.pdf

Defra 2005. The Farm Scale Evaluations. Department for Environment Food and Rural Affair, United Kingdom. http://www.defra.gov.uk/environment/gm/fse/index.htm

De Wet, J.M.J., and J.R. Harlan 1975. Weeds and domesticates: Evolution in the man-made habitat. Economic Botany 29:99–107.

Eastick, R. 2002. Evaluation of the Potential Weediness of Transgenic Cotton in

Northern Australia. Report No. Technical Bulletin no. 305, Northern Territory Government and Australian Cotton Cooperative Research Centre. http://cotton.pi.csiro.au/Assets/PDFFiles/TB3051.pdf

Ellstrand, N.C., H.C. Prentice and J.F. Hancock 1999. Gene flow and introgression from domesticated plants into their wild relatives. Annu. Rev. Ecol. Syst. 30:339-363.

EPA 1998. Guidelines for Ecological Risk Assessment. U.S. Environmental Protection Agency, Risk Assessment Forum, Washington, DC, EPA/630/R095/002F. http://cfpub.epa.gov/ncea/cfm/recordisplay.cfm?deid=12460

Ervin, D. and R. Welsh 2003. Environmental effects of genetically modified Crops: differentiated risk assessment and management. In J.H.H Wesseler (ed.) Proceedings of the Frontis Workshop on Environmental Costs and Benefits of Transgenic Crops. Pp 7-29. Wageningen. http://library.wur.nl/frontis/transgenic_crops/02a_ervin.pdf

European Commission. 2001. Directive 2001/18/EC of the European Parliament and of the Council of 12 March 2001 on the deliberate release into the environment of genetically modified organisms and repealing Council Directive 90/220/EEC. Official Journal of the European Communities 17.4.2001: L 106:1–38.

Gray, A.J. 2002. Risk assessment for LMOs: a European Perspective. In: C.R. Roseland (Ed). LMOs and the Environment. Proceedings of an International Conference. Pp 47-54. OECD. http://www.oecd.org/dataoecd/40/56/31526579.pdf

Groves, R. H., F.D. Panetta and J.G. Virtue (eds.) 2001. Weed Risk Assessment. CSIRO Publishing, Collingwood, Australia. 244p

Hayashi, K. 2004. Revised regulatory framework for GMOs in Japan: new regulatory systems and approval process for environment and food safety. 2004 International Symposium of Safety Assessment of GM Crops and Foods. http://agsearch.snu.ac.kr/haksul/seminar/pds/2004_symposium/pdf/Article_KenichiHayashi.pdf

Hayes, K.R. 2004. Best practice and current practice in ecological risk assessment for genetically modified organisms. http://www.deh.gov.au/settlements/publications/biotechnology/ecological-risk/pubs/ecological-risk.pdf

Hancock, J.F. 2003. A framework for assessing the risk of transgenic crops.

BioScience 53:512-519.

Hancock, J.E. and K.E. Hokanson 2001. Invasiveness of transgenic vs. exotic plant species: how useful is the analogy? In S.H. Strauss and H.D. Bradshaw (eds.) Proceeding of the First International Symposium on Ecological and Societal Aspects of Transgenic Plantations. pp 187-192. http://www.fsl.orst.edu/tgerc/iufro2001/eprocd_29.pdf

Heard MS, C. Hawes, G.T. Champion, S.J. Clark, L.G. Firbank, A.J. Haughton, A.M. Parish, J.N. Perry, P. Rothery, R.J. Scott, M.P. Skellern, G.R.

Squire and M.O. Hill 2003. Weeds in fields with contrasting conventional and genetically modified herbicide-tolerant crops. 1. effects on abundance and diversity. Phil. Trans. R. Soc. Lond. B 358: 1819-1832.

James, Clive 2005. Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops: 2004, International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications. http://www.isaaa.org/

Keeler, K. 1989. Can genetically engineered crops become weeds? Bio/technology 7:1134-1139.

Kjær, C., C. Damgaard, G. Kjellsson, B. Strandberg, and M. Strandberg 1999. Ecological risk assessment of genetically modified higher plants (GMHP) – Identification of data needs. NERI Techical Report, No. 303, National Environmental Research Institute, Denmark.

Koivisto, R.A., K.M. Törmäkangas, and V.S. Kauppinen 2001. Hazard identification and risk assessment procedure for genetically modified plants in the field -GMHAZID. Environ. Sci. Pollut. Res. 8:1–7.

NRC (National Research Council) 1989. Field Testing Genetically Modified Organisms: Framework for Decisions. National Academy Press, Washington, DC.

NRC (National Research Council) 2002. Environmental Effects of Transgenic Plants: The Scope and Adequacy of Regulation. National Academy Press, Washington, DC.

OGTR/Australia 2005. Risk Analysis Framework. Office of the Gene Technology Regulator, Australia. http://www.ogtr.gov.au/pdf/public/raffinal2.2.pdf

Parker, I.M. & P. Kareiva 1996. Assessing the risks of invasion for genetically engineered plants: acceptable evidence and reasonable doubt. Biological Conservation 78, 193-203.

Purrington, C. B., and J. Bergelson 1995. Assessing weediness of transgenic crops:

Industry plays plant ecologist Trends Ecol. Evol. 10:340-342.

Radosevich S.R. and J.S. Holt 1984. Weed ecology: Implication for Vegetation Management. Wiley.

Randall, J.M. 1997. Defining weeds of natural areas. pp. 18-25 In J. Luken AND J. Theiret (eds.) Assessment and management of plant invasions. Springer.

Rissler, J. and M. Mellon. 1993. Perils amidst the promise: ecological risks of transgenic crops in a global market. Union of Concerned Scientists. Cambridge, MA. http://www.bdt.fat.org.br/binas/Library/ucs/

表一、理想雜草特性（weed characteristics）（Baker 1956, 1974）

1. Germination requirements fulfilled in many environments
   不同環境下可發芽
2. Discontinuous germination (internally controlled) and great longevity of seed
   種子壽命長且不連續發芽
3. Rapid growth through vegetative phase to flowering
   快速生長至開花期
4. Continuous seed production for as long as growing conditions permit
   連續種子生產
5. Self-compatible, but not completely autogamous or apomictic
   自交親和
6. When cross-pollinated, unspecialized visitors or wind utilized
   風力或非特定授粉者雜交
7. Very high seed output in favorable environmental circumstances
   適宜環境下極高種子生產
8. Produces some seed in wide range of environmental conditions; tolerant and plastic
   具耐性及塑性不同環境下產生種子環境
9. Has adaptations for short- and long-distance dispersal
   短距及長距散佈
10. If a perennial, has vigorous vegetative reproduction or regeneration from fragments
    強勢營養繁殖或再生力
11. If a perennial, has brittleness, so not easily drawn from ground
    具脆斷性不易拔除
12. Has ability to compete interspecifically by special means (rosette, choking growth, allelochemics)
    具種間競爭力

表二、轉殖植物雜草風險評估項目之文獻列舉

文獻	雜草特性及雜草性（weediness) 風險評估項目	附註
Calgene (1994)	seed germination (from various depths), dormancy (baseline, heat-induced, cold-induced), seed bank decay (2 years), seedling vigor, stand establishment, pest susceptibililty, winter survival, pollen movement, hybridization with wild relatives	Calgene 公司油菜商業栽培之測試項目
Purrington (1995)	seed viability, seed dormancy, seed production, seed dispersal, growth rate, growth period, clonal reproduction, lifetime survivorship, competitiveness, geographic range, pollen flow, pollen performance, fitness of hybrids with other cultivars, fitness of hybrids with wild species	文獻整理列舉實際雜草風險測試所採用之項目
Eastick (2002)	seed germination, dispersal, survivorship(plant numbers), fecundity (seed production, seedlings recruitment), invasiveness (population growth rate)	棉花商業栽培之雜草風險評估
Hayes (2003)	density dependant threshold, fitness and competitive ability, intrinsic rate of increase, pollen dispersal, pollen viability, seed dispersal, seed dormancy and replacement, hybridization and introgression, gene flow, horizontal gene flow, spread, establishment	列舉雜草風險相關測試項目
Heard (2003)	seed banks, seed rains, weed densities, weed biomass	大規模田間評估之項目

表三、澳大利亞轉殖生物風險程度之劃分，風險等級（high, moderate, low, negligible）由風險可能性（likelihood）及後果（consquences）之組合所決定。（OGTR/Australia 2005）

Likelihood \ Consequences	Marginal	Minor	Intermediate	Major
Highly likely	Low	Moderate	High	High
Likely	Negligible	Low	High	High
Unlikely	Negligible	Low	Moderate	High
Highly unlikely	Negligible	Negligible	Low	Moderate

表四、歐美學者對轉殖植物環境風險階層測試（tier test）之重點內容

階層	雜草性（weediness）評估 (Rissler 1993)	一般性環境評估 (Kjær et al 1999)
Tier 1	親本之雜草性（文獻資料顯示具雜草性者進入次階，否則行簡單測試）	受體植物及表現特性基本資料
Tier 2	基因轉殖作物之生態表現（進行族群代換（population replacement)試驗：淨代換率大於 1 者屬高風險，進入次階評估，小於 1 者屬低風險，不需再評估）	受體植物進一步評估（繁殖力、雜交可能性）
Tier 3	基因轉殖作物之雜草性（進行決定雜草性之特別試驗，決定風險是否可接受）	實驗室及小規模測試（生態適應性改變測試、雜交率與自然回交評估）
Tier 4	-	田間評估（入侵性評估）
Tier 5	-	區域及地景效果評估

表五、Hancock(2003)對轉殖作物雜草風險評估架構之簡要訊息，實際測試之需求因轉基因（TA-TE）與植物類別（S1-S6）之組合而定。

A：植物類別及相關特性

植物類別	作物之雜草性狀	自然環境長存性 (persistent)	本地近緣植物
S1	雜草性狀少(低於40%)	不長存	無近緣植物
S2	具中等數量之雜草性狀	不長存	無近緣植物
S3	具多數雜草性狀	可逸出栽培環境長存	無交配親和之野生近緣種
S4	少數雜草性狀	可逸出栽培環境不長存	有交配親和之野生近緣種
S5	具中等數量之雜草性狀，近緣種　不擴散	可逸出栽培環長存	具親和性之野生近緣種
S6	具多數雜草性狀，近緣種強勢擴散性	可逸出栽培環境長存	具親和性之野生近緣種

B：轉基因類別及環境適應

轉基因類別	相關基因	適應性衝擊（fitness impact）
TA	標記基因	中性-不影響環境適應
TB	雄不育, 纖維品質, 果實成熟, 果實儲藏	不利環境適應
TC	抗除草劑	受作物與近緣種入侵性影響而異
TD	病毒、真菌、害蟲抗性	受生物防治水準而異
TE	抗逆境(寒、乾、金屬)，改變養分吸收, 改變發育	有助環境適應

C：轉基因/植物類別組合之測試需求

轉基因類別/植物類別組合	進一步評估之項目
TA/S1-S6; TB/S1-S3, S5,S6; TC/S1,S2,S4,S5; TD/S1,S2; TE/S1	可釋放（release）不需再測試
TB/S4, S5, S6	確認不危及野生種
TC/S3, S6	確認野生種可被防治
TD/S1, S2	確定野生族群含有相似表現型，否則需測度生物防治水準，測試當地環境轉殖作物及雜交植物之適應性
TE/S1	確定野生族群含有相似表現型，否則測試當地環境轉殖作物及雜交植物之適應性

Weed risk of transgenic plants: research and assessment

Mou-Yen Chiang* and Chiou-Ing Yuan
Taiwan Agricultural Chemicals and Toxic Substances Research Institute

Abstract

Weediness is the major environmental concern of transgenic plant. It is covered along with other major hazards such as gene flow, non-target and evolution of resistance for most environmental risk assessment of genetic modified plants. Currently, all weed risk assessment of genetic modified plants are qualitative in nature, and based on comparative evaluation of modified plant with the appropriate un-modified counterpart. Major parameters for weediness evaluation are seed germination, seedling vigor, vegetative growth, seed production, proprogule dispersal, dormancy, seed bank, stress tolerance (biotic/non-biotic), survival rate and net replacement rate. Subset of these parameters is used to characterize invasiveness, persistence, competitiveness or ecological fitness of transgenic plant. Ideally, assessment needs to deal with likelihood and consequence of risk, and risk level determined by interaction of these two components is subsequently used for management and regulatory decision. Based on literature review, we present expert-proposed approaches for differential treatment of risk assessment covering tier systems and category systems on risk level. Case studies on weed risk assessment presented cover transgenic produced maize, canola and cotton. In Taiwan, considerable resources are allocated for development of transgenic plants and related upstream research. However, framework and procedures of environment assessment are still at the enfant stage of development. This would slow down the eventual commercialization of transgenic plant. We introduce current situation on environment safety of transgenic plants in Taiwan with emphasis on weed, and propose future direction and approaches suitable for local condition.

Key words：Weediness, GMT, GMC, Risk Assessment, Environmental Safety

---

*（corresponding author; E-mail: myc@tractri.gov.tw; Tel: 886-4-23302101-602; Fax: 886-4- 23323073）